土地整治的生态系统服务价值评估
——参数优化与实证①

赵鸿雁[1]，陈 英[1,2]，裴婷婷[2]，谢保鹏[2]，周 翼[2]，
任玺锦[2]，刘 洋[3]
（1. 甘肃农业大学资源与环境学院，甘肃 兰州 730070；2. 甘肃农业大学管理学院，甘肃 兰州 730070；
3. 南京农业大学中国土地问题研究中心，江苏 南京 210095）

摘 要：为定量研究具体区域土地整治前后生态系统服务价值的变化情况，本研究以庆阳市土地整治子项目为例，依据生态系统服务价值评估方法的局限性对其参数进行相应优化的基础上，对研究区内土地整治前后的生态系统服务价值变化进行实证分析。结果表明：① 通过尺度推演，将宏观大尺度的生态系统服务价值评估方法进行了市场因素修正、特殊生态系统类型价值当量的制定以及针对区域内部差异的 NPP 修正，降低了当量因子法应用到具体尺度上的局限性，使其更具合理性。② 基于优化参数的实证得到，土地整治前后 4 a 间生态系统服务价值由 2.88×10^8 元减少到 2.76×10^8 元，减少了 4.31%。在一级分类体系下，只有调节服务的生态系统服务价值减少了 1.84×10^7 元，其余服务均相对增加；在二级分类体系下，多项服务较土地整治前均有所增加，且食物生产服务的增加量最大为 8.35×10^6 元，原料生产、生物多样性以及 4 项调节服务均相对减少。本研究的实证结果更符合具体区域实际情况，参数优化后的方法可用于坡耕地转变为梯田的生态系统服务价值评估，为区域内部残丘陵、沟谷、坡地等地貌类型的黄土丘陵沟壑区土地整治的生态系统服务价值评估可提供参考。

关键词：生态系统服务；土地整治；参数优化；庆阳市

土地作为一种产权化的重要自然资源，土地整治通过改变其利用方式和结构，将其投入到人类社会经济活动中，经市场运作转化为自然产品的同时，实现了其生态与经济价值[1-2]。生态系统服务作为联系人类社会经济系统与自然生态系统的桥梁[3-5]，对其价值的评估结果能够作为衡量和表征土地整治生态价值的重要指标，也能为土地整治的生态成效提供参考[6-8]。目前，关于生态系统服务价值评估方面的研究主要集中在基于不同的空间尺度、生态系统类型和生态系统服务类型，选取不同的生态系统服务价值评估方法与模型所进行的评估[9-13]。生态系统服务价值评估方法——当量因子法以其数据的较易获取性和计算的简便性广为使用[14-15]，但其核心参数——单位面积生态系统服务价值是一个基于全国平均水平的当量值，针对具体区域、区域内部差异性及特殊区域差别化的土地整治政策，当量因子法局限于因地制宜的实用性，通过优化全国平均水平的价值当量来进行生态系统服务价值变化方面的研究鲜有涉及。

鉴于甘肃中东部黄土高原农业区生态环境脆弱，水土流失治理多年，在生态保护上尊重自然并试图将自然提供给社会的多元价值整合到决策管理过程，从而提高全人类福祉的大环境背景下其治理成效备受关注[16]。考虑到生态系统服务价值评估方法的实用性，以及已有应用该方法评估土地整治前后生态系统服务价值变化的相关科学研究与人们对于土地整治应有成效的主观认知间的不一致性，本研究将全国平均水平的价值当量进行了相应优化，并运用于小尺度土地整治项目区进行实证，探讨参数优化后土地整治前后生态系统服务价值的变化情况。以期将土地整治中的自然资本与生态系统服务纳入决策管理过程，提高自然惠益，保障并提高全人类福祉。

① **收稿日期：**2019－06－09； **修订日期：**2019－09－02
基金项目：国家自然科学基金项目（71563001）；学科建设基金项目（GAU－XKJS－2018－089）资助
作者简介：赵鸿雁（1993－），女，硕士研究生，主要从事恢复生态学方面的研究. E-mail：glzlqw211117@126.com
通讯作者：陈英. E-mail：cheny@gsau.edu.cn

1 研究区概况

庆阳市地形北高南低,海拔 885 ~2 082 m,降雨量南多北少,多集中于7—9 月份;气温南高北低,年平均气温 8.7 ~9.5 ℃。2016 年全市平均降水量 329.4 ~499.8 mm,庆城、合水偏少;气温偏高,年平均气温9.3~11.2 ℃。甘肃省生态功能区划将庆阳市分为北部黄土丘陵沟壑区,土壤侵蚀极敏感区;中南部黄土高原沟壑区,土壤侵蚀极敏感区;东部黄土丘陵区,生物多样性及生境极敏感区。截至 2016 年年底,全市实现生产总值 5.98×10^{10}元,总量比上年缩水 1.16×10^{9} 元;同比增长 8.2%,增速低于去年 0.8 个百分点。实现农业增加值 7.07×10^{9} 元,增长 6.3%。全市粮食播种面积 4.7×10^{5} hm^2,增加 166.67 hm^2。粮食产量 1.57×10^{6} t,同比减产 6.39×10^{4} t,下降 3.9%。其中夏粮产量 4.20×10^{5} t,减产 1.52×10^{4} t,下降 3.5%;秋粮产量 1.15×10^{6} t,减产 4.88×10^{4} t,下降 4.1%。本研究剔除掉 2014 年土地整治子项目中 2017 年竣工的两个子项目及宁县和盛镇焦村乡东乐村等 18 个村宅基地复垦项目,共选取 2014 年的土地整治子项目 5 个。具体情况如图 1 所示。

2 研究方法参数优化与数据来源

2.1 研究方法及其局限性分析

2.1.1 *研究方法* 当量因子法[17]将 1 个标准当量因子的生态系统服务价值量定义为单位面积农田生态系统粮食生产的净利润。采用研究区内 3 大主要粮食作物小麦、玉米和大豆来衡量土地生态系统粮食产量的价值,具体计算如下所示。

$$\begin{cases} ESV = \sum_{k=1}^{n} A_k \times VC_k & (1) \\ D = S_w \times F_w + S_c \times F_c + S_t \times F_t & (2) \end{cases}$$

式中:ESV 为生态系统服务价值(10^4 元);A_k 为研究区第 k 类土地利用类型的面积(hm^2);VC_k 为生态系统价值系数(元·hm^{-2})。D 表示 1 个标准当量因子的生态系统服务价值量(元·hm^{-2});S_w、S_c、S_t 分别表示当年小麦、玉米和大豆的播种面积占 3 种作物总播种面积的百分比(%);F_w、F_c、F_t 分别表示全国小麦、玉米和大豆的单位面积平均利润(元·hm^{-2})。

2.1.2 *研究方法的局限性分析* 当量因子法所估算的生态系统服务价值是以评估年农产品价格为价值基础,体现出以价格为表征的价值量的不同。由于全球和国内各气候要素的不同而形成不同的生态环境,其所提供的生态系统服务价值量因存在某种程度上的针对性而有所不同,在国内不同区域其生态系统服务价值量亦有所不同,所以,基于全国平均水平量化的生态系统服务价值量较难反映区域生态系统服务的真实水平。基于以上分析可得到全国平均水平的当量因子法运用于具体区域上存在的局限性:① 决定标准当量大小的粮食作物的净利润受价格波动和货币贬值的影响明显;② 具体区域内部由于种植不同的粮食作物,其生态系统类型差异较大,因地制宜的实用性较差;③ 区域内部的差异性体现不明显。

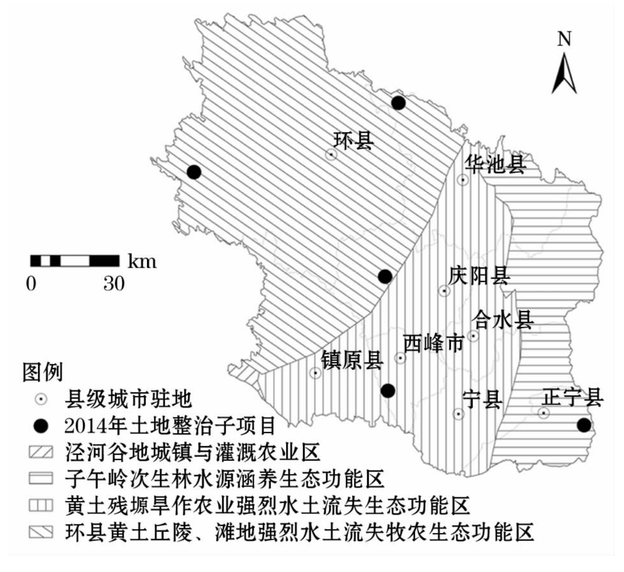


图 1 研究区概况

Fig. 1 General situation of study area

2.2 研究方法的参数优化

2.2.1 *粮食作物单位面积平均利润的改进* 本研究中涉及的 3 大主要粮食作物小麦、玉米和大豆的单位面积平均利润数据来源于《全国农产品成本收益汇编资料》中的净利润,净利润反映了生产中消耗的全部资源的净回报,其计算公式为:净利润 = 产值 - 总成本。市场价格与产值大小紧密相关,由此可见,净利润计算公式中产值直接影响着净利润大小。农产品生产价格指数客观反映出全国农产品生产价格水平和结构变动情况,因此,为消除市场价格对净利润的影响,本研究将 2016 年的净利润通过农产品生产价格指数进行修正[17-18],具体修正公式如下所示:

$$y_n = \begin{cases} 100, & n = 2012 \\ x_n, & n = 2013 \\ \dfrac{x_n \times y_{n-1}}{100}, & n = 2014, 2015, 2016 \end{cases}$$

式中:x_n 指相对于上一年等于 100 的第 n 年的农产品生产价格指数,y_n 指相对于基期年 2012 年等于 100 的第 n 年的农产品生产价格指数;$n = 2012, \cdots, 2016$。

2.2.2 单位面积生态系统服务价值当量因子的改进及修正 对单位面积生态系统服务价值当量因子主要运用实物量法、特尔菲法改进以及由 CASA 模型估算的 NPP 进行修正,改进即对研究区内土地整治前后广泛分布的坡耕地与梯田的单位面积生态系统服务价值当量因子进行制定。具体过程为:① 参考相关指标运用实物量法对坡耕地与梯田的当量因子进行初步设定(表 1)。② 邀请了了解、甚至从项目的可行性研究、项目设计、项目招投标、项目施工、项目竣工验收等各个环节全程参与研究区土地整治项目的 12 位专家,根据研究项目区实际情况、实物量法研究得到的坡耕地与梯田当量因子以及已有相关研究成果进行了两轮专家打分。③ 在求取实物量法与特尔菲法所得当量因子平均值的基础上,运用 CASA 模型估算得到的甘肃省农业区 NPP 修正系数对其进行修正。

表 1 基于实物量法的坡耕地与梯田当量因子

Tab. 1 Equivalent factors of slope farmland and terrace based on real quantity method

一级分类	二级分类	参考指标	坡耕地	梯田	当量因子		
					旱地	坡耕地	梯田
供给服务	食物生产	粮食作物的平均产量[19](kg · hm^{-2})	2 416.34	4 336.5	0.85	0.7	1.26
	原料生产	饲草产量/林草覆盖率(%)	20.03	11.71	0.4	0.34	0.2
	水资源供给	0 ~ 60 cm 的土层土壤含水率[20-21](%)	最大增加率 46.1%		0.02	0.016	0.024
调节服务	气体调节	原料生产服务的单位面积生态系统服务价值当量因子			0.67	0.57	0.34
	气候调节				0.36	0.31	0.18
	净化环境	植被覆盖率与降雨拦蓄率(%)	植被覆盖率 81.85%	植被覆盖率85.73%,降雨拦蓄率可提高 40% ~ 69%	0.27	0.22	0.38
	水文调节				0.1	0.08	0.09
支持服务	土壤保持	保水减沙增加率[22](%)	最大可以达到 41.18%		1.03	0.84	1.18
	维持养分循环	20 ~ 40 cm 与 40 ~ 60 cm 土层土壤有机碳增加率[21,23](%)	分别增加 54.6% 与 52.4%		0.12	0.1	0.15
	生物多样性	Simpson(D)指数与 Shannon-Wienner(H)指数[24]	0.5 与 1.03	0.65 与 1.19	0.12	0.13	0.16
文化服务	美学景观	土地利用率(%)	76.37%	86.59%	0.06	0.05	0.08

2.2 数据来源

(1) MODIS 数据 MOD13A2:MODIS(Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer)数据产品 2012 与 2016 年的 MOD13A2 数据来源于美国 LP DAAC(Land Process Distributed Active Archive Center, U. S. A)。

(2) 降水、气温与太阳辐射数据:2012 年与 2016 年的降水、气温与太阳辐射数据来源于寒区旱区科学数据中心,是中国区域高时空分辨率地面气象要素驱动数据集,SWAT 模型中国大气同化驱动数据集(CMADS V1.0)。

(3) 土地覆盖数据:甘肃省 2010 年、2015 年的土地覆盖数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心,空间分辨率 1 km,包括 6 个一级类与 25 个二级类。

(4) 小麦、玉米和大豆的播种面积及单位面积净利润数据:3 大类粮食作物播种面积数据来源于 2013 年与 2017 年《庆阳市统计年鉴》,农产品净利润数据来源于 2013 年与 2017 年《全国农产品成本收益汇编资料》。

(5) 地类面积数据:土地整治前后的地类面积数据来源于《甘肃东部百万亩土地整治重大工程项目》中的庆阳市子项目设计报告与竣工报告。

3 结果与分析

3.1 生态系统服务价值评估方法的参数优化

生态系统服务价值评估方法的参数优化:① 根

据农产品生产价格指数对粮食作物单位面积利润进行修正,实现对标准当量的修正。② 根据全国平均水平下谢高地等[17]制定的旱地生态系统单位面积生态系统服务价值当量因子,对其进行实物量法与特尔菲法改进(制定坡耕地与梯田生态系统的当量因子),并对改进后的当量因子依据朱文泉改进的CASA模型所估算的NPP进行相应的修正(根据土地整治前后的甘肃省农业区NPP均值428.37 $g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$和408.69 $g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$与土地整治前后的甘肃省农业区NPP均值722.49 $g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$和611.77 $g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$,计算得到研究区土地整治前后NPP修正系数1.69和1.5),从而实现坡耕地与梯田生态系统当量因子的制定及修正,并进一步实现生态系统服务价值评估方法的参数优化。

对于水浇地的当量因子参考赵鸿雁等[3]关于甘肃省水浇地当量因子的设定;其他林地的当量因子根据其郁闭度与灌木林地的郁闭度之间的关系进行修正得到;其他草地根据其覆盖度与草原覆盖度间的关系进行修正得到;田坎的当量因子采用荒漠地类[17]的当量因子;有林地、灌木林地参考谢高地等[17]的研究成果;农村道路、村庄以及废弃宅基地均视为建设用地,当量因子设为0。以此实现研究区内各变化地类当量因子参数的优化。优化后得到的各类生态系统的单位面积生态系统服务价值当量因子结果如表2。

由表2得知,优化后的坡耕地与梯田生态系统的当量因子避免了全国平均水平下的当量因子将坡耕地认定为旱地而过高,或将梯田认定为旱地而过低地估算各自所能够提供的生态系统服务价值的大小,体现了优化后参数的合理性。其中,梯田生态系统中只有原料生产服务功能的当量因子低于坡耕地生态系统,这是由于区域内为实现资源最大程度的有效利用以及为区域粮食安全提供最大保障,梯田生态系统中饲草类作物种植显著低于坡耕地,而以粮食作物种植代替之;同时,粮食作物秸秆亦为重要的饲草,所以原料生产服务功能减少程度较小。梯田生态系统中其余生态系统服务的当量因子均高于坡耕地,这也充分说明研究区内坡改梯工程的实施对区域内各生态系统类型提供各项生态系统服务的积极影响。参数优化后的生态系统服务价值评估方法降低了当量因子法运用到具体应用尺度上的局限性,符合土地整治的初衷,且与人们对于土地整治的主观认知不谋而合,更具有合理性。

表2 不同生态系统类型各项生态系统服务的当量因子

Tab. 2 Equivalent factors of ecosystem services in different ecosystem types

生态系统服务	坡耕地	梯田	水浇地	有林地	灌木林地	其他林地	其他草地	田坎
食物生产	1.17	1.92	1.27	0.31	0.19	0.06	0.03	0.01
原料生产	0.59	0.57	0.06	0.71	0.43	0.13	0.04	0.03
水资源供给	0.03	0.04	-1.84	0.37	0.22	0.07	0.02	0.02
气体调节	0.96	1.25	0.89	2.35	1.41	0.42	0.13	0.11
气候调节	0.52	0.68	0.47	7.03	4.23	1.27	0.34	0.1
净化环境	0.12	0.18	0.14	1.99	1.28	0.38	0.11	0.31
水文调节	0.37	0.63	1.9	3.51	3.35	1.01	0.25	0.21
土壤保持	1.35	2.16	0.01	2.86	1.72	0.52	0.16	0.13
维持养分循环	0.12	0.23	0.16	0.22	0.13	0.04	0.01	0.01
生物多样性	0.20	0.30	0.17	2.60	1.57	0.47	0.14	0.12
美学景观	0.08	0.17	0.08	1.14	0.69	0.21	0.06	0.05

3.2 基于优化参数的土地整治前后生态系统服务价值变化

本研究将土地整治前的旱地全部认为是坡耕地,土地整治前的农村道路、废弃宅基地及村庄面积分别为228.66 hm^2、160.88 hm^2和22.04 hm^2;土地整治后的农村道路、废弃宅基地及村庄面积分别为279.01 hm^2、133.7 hm^2和21.37 hm^2,参考谢高地等[17]的处理,将其单位面积生态系统服务价值当量因子设为0,故其所提供的生态系统服务价值为0。由于选取的土地整治项目是在2015年3月之前竣工的2014年实施的土地整治子项目,鉴于2017年部分数据收集困难,考虑到土地整治后的滞后期,选取2016年为土地整治后年份。本研究在以2012年为土地整治前年份的基础上,将土地整治前的旱地全部视为坡耕地,整治后的旱地全部视为梯田,所以

土地整治之后坡耕地的面积为0。根据优化后的参数和土地整治前后各变化地类的分布面积，计算得到土地整治前后项目区生态系统服务价值变化如(表3)，同时基于土地整治后不同生态系统服务类型所提供的生态系统服务价值的大小对其进行排序，得到土地整治前后不同生态系统服务类型提供的生态系统服务价值变化(图2)。

由表3和图2可知，总体上土地整治前后4 a间生态系统服务价值由 2.88×10^8 元减少到 2.76×10^8 元，减少了4.31%，年均减少量为 3.11×10^6 元。生态系统服务一级分类体系下，只有调节服务的生态系统服务价值减少了 1.84×10^7 元；支持服务、供给服务以及文化服务的生态系统服务价值分别增加了 4.86×10^6 元、6.72×10^5 元和 4.05×10^5 元。在生态系统服务二级分类体系下，食物生产、土壤保持、维持养分循环、美学价值和水资源供给功能较土地整治前有所增加，食物生产功能的增加量 8.35×10^6 元，为最大，很明显实现了土地整治提高耕地产能的初衷；土地整治后区域土地分布更为规整，在地形重塑的基础上地形更加平坦，一方面，对于地表径流的截留和利用率等方面有很大提高，其中土地整治前后降雨拦蓄率可以提高69%，加上区域实施的补灌，使区域内土壤含水率明显增加，水资源供给功能的增加幅度最大，为108.30%。另一方面，减少了地表径流对土壤有机表层的侵蚀，减少了水土流失，土壤保持功能与维持养分循环功能明显

表3 土地整治前后生态系统服务价值的变化量

Tab.3 Variation of ecosystem service value before and after land consolidation

生态系统服务		土地整治前生态系统服务价值/10^4 元	土地整治后生态系统服务价值/10^4 元	增量/10^4 元	增加率/%	增量/10^4 元
供给服务	食物生产	4 997.55	5 832.08	834.53	16.70	67.16
	原料生产	2 574.48	1 790.54	-783.94	-30.45	
	水资源供给	15.3	31.87	16.57	108.30	
调节服务	气体调节	4 600.46	4 095.26	-505.20	-10.98	-1 836.89
	气候调节	3 744.42	2 922.58	-821.84	-21.95	
	净化环境	1 158.41	875.56	-282.85	-24.42	
	水文调节	2 831.6	2 604.6	-227.00	-8.02	
支持服务	土壤保持	6 229.66	6 793.37	563.71	9.05	486.31
	维持养分循环	557.86	720.8	162.94	29.21	
	生物多样性	1 501.95	1 261.61	-240.34	-16.00	
文化服务	美学景观	624.61	665.07	40.46	6.48	40.46
合计		28 836.29	27 593.34	-1 242.95	-4.31	-1 242.96

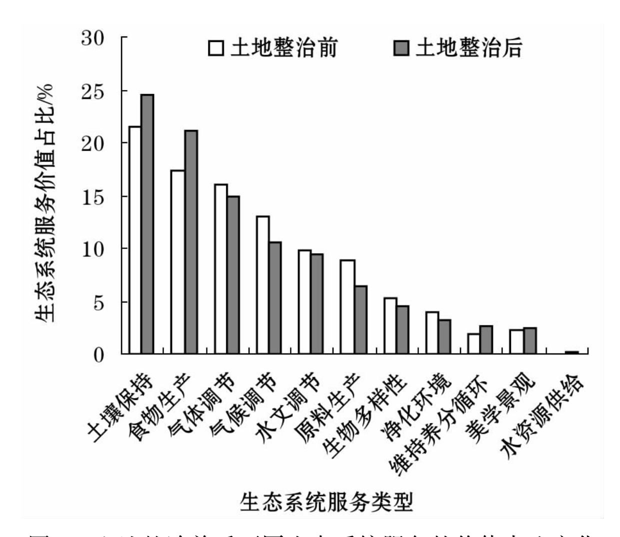


图2 土地整治前后不同生态系统服务的价值占比变化

Fig.2 Variation of value proportion of different ecosystem services before and after land consolidation

提高。土地整治后区域内的"馒头山"转变成了"花卷山"，从景观角度上来说具有一定的美学价值，且防护林以及田间道路的建设也在一定程度上塑造了相应的景观功能。

原料生产、生物多样性以及调节服务所包含的4类生态系统服务均呈现出减少的趋势。土地整治后耕地质量与产能均相对提高，多用来种植粮食作物或经济作物，饲草类作物种植相对减少，原料生产服务功能降低；虽有小麦、玉米等农作物秸秆补充一定的饲草量，但也不能弥补饲草类作物种植面积减少所带来的原料生产服务的降低。土地整治实施过程中对土壤的碾压、田间道路、灌排等设施的建设，使得人为活动增加，斑块内部物种遭到损害；土壤微环境受到影响，导致生物多样性降低。从景观管理

角度来说，整个土地整治过程改变了区域景观格局，加之地形重塑，对局部小气候循环产生影响；坡改梯工程破坏了原有地表上的自然植被，由于土地整治后防护林的种植年份相对较短，较难全面发挥其对区域大气环流、水分循环以及环境的净化调节作用，所以，理论上调节服务功能的增加是在土地整治实施后一定时期内所体现的。主要目的在于防风固沙与净化环境的防护林种植，由于树苗种植时间相对较短，其提供生态系统服务功能的作用相对不高，加之自然植被的破坏，使其降低幅度相对较大。从土地整治工程实施过程的角度来说，部分区域施工过程中不严格按照技术规程施工，表土剥离不到位等检漏现象也在一定程度上造成了区域内相应生态系统服务价值降低或提高不明显的现象。

4 讨 论

土地整治自提升到国家战略层面，其丰富多样的整治类型为土地整治中生态系统服务变化方面的研究提供了多样的案例，更加方便了不同尺度上的研究。土地整治对生态系统服务的影响是双向的，土地整治中首当其冲的是保障国家粮食安全[25]，同时也要保证较高的供给能力，但必须指出的是，供给服务提高的同时，调节服务和文化服务不一定随其呈现出增加的现象，相反，供给服务的增加可能会使调节服务降低，文化服务有所受损，它们之间有时是矛盾、对立的[26-27]。因此，必须权衡土地整治中的关键生态系统服务功能，科学集成区域内各项生态系统服务来实现区域生态系统服务的优化，进而控制土地整治中的关键生态系统服务及其时空布局，避免负面影响的出现，寻求供给、调节、支持与文化服务间的最佳权衡[7]。

当量因子的改进中所制定的坡耕地和梯田当量因子主要依据的是坡耕地与梯田产量的比值情况，并对其进行了未充分考虑市场因素的修正和空间差异针对性的修正，具有一定的科学性。但仍存在某种程度上的不足：① 标准当量的修正仍然不能完全消除市场因素。因为，市场价格波动直接影响着农民种植粮食作物的结构比例，在保证一些必要粮食作物种植面积不变的基础上有所倾向，这样会使得粮食作物种植面积也成为影响准确衡量粮食产量经济价值的一个重要因素，依然有人为因素（市场因素）的影响，无法完全消除人为因素的影响来准确衡量自然生态系统的产出，其结果的准确性相对来说有所提高，但仍存在一定程度上的不准确性。② 本研究中所采用的生态系统服务分类体系对生态系统的生态系统服务可能会存在重复计算，坡耕地与梯田生态系统的当量因子制定及修正过程中，对生态保护方面的考虑难以全面，将其运用于以生态保护为主旋律的现代社会的土地整治中同样具有一定的不全面性。

土地整治后其价值量的减少，从某种程度上说明土地整治实施过程中对生态环境有所扰动，减少了生态系统的生态产出和贡献。余强等[28]研究得到土地整治后两个土地整治项目生态系统服务价值损失了 70.77×10^4 元·a^{-1} 和 56.59×10^4 元·a^{-1}，减少率达到了 5.87% 和 3.6%。李立平等[29]也研究得到土地整治前后榆阳区生态系统服务价值减少了 401.78×10^4 元。本研究得到研究区内的 5 个土地整治项目，平均每个土地整治项目的年平均生态系统服务价值减少量为 62.15×10^4 元。相较于其他运用当量因子法所得到的土地整治前后生态系统服务价值的变化，其减少量相对减少。但本研究中土地整治前后生态系统服务价值减少量依然相对较大，一方面，已有相关科学研究所选取的土地整治前后研究时段相对较长，本研究受数据获取的限制，选取土地整治完成后的第 2 年为土地整治后年份，由于土地整治滞后期（2 a）的存在，使得其生态系统服务价值减少量较大；另一方面，食物生产等供给服务在小尺度短时段内可以看出其成效，但调节服务涉及较大范围的大气与水分等的循环，在小尺度短时段内较难体现其效应，土地整治后调节服务相对较低，从而使其生态系统服务价值减少量较大。土地整治过程中地形重塑对区域生态环境的扰动和其他生态保护与修复工程兼施，也对区域生态系统服务价值的降低具有一定程度上的影响。应该重视各种生态工程之间的有机联系，避免出现客观上各自为战的情况，同时应加强工程实施过程中对生态环境的保护，实现区域生态环境改善，提高自然惠益。

5 结 论

（1）通过尺度推演，将宏观大尺度上的生态系统服务价值评估方法进行了相应的改进与修正，包括粮食作物单位面积平均利润的市场价格波动和货

币贬值修正、坡耕地与梯田价值当量的因地制宜改进以及针对区域内部空间差异的价值当量 NPP 修正，改进后的评估方法在具体应用尺度上更符合当地实际情况。

（2）基于改进价值当量的土地整治前后生态系统服务价值变化的实证结果显示，土地整治前后 4 a 间生态系统服务价值由 2.88×10^8 元减少到了 2.76×10^8 元，减少了 4.31%。生态系统服务一级分类体系下，只有调节服务的生态系统服务价值减少了 1.84×10^7 元，其余服务均相对增加；在二级分类体系下，食物生产、土壤保持、维持养分循环、美学价值和水资源供给功能较土地整治前有所提高，食物生产服务价值的增加量最大为 8.35×10^6 元；原料生产、生物多样性以及 4 项二级调节服务均相对减少。参数优化后的方法可用于坡耕地转变为梯田的生态系统服务价值评估，为区域内部残丘陵、沟谷、坡地等地貌类型的黄土丘陵沟壑区土地整治的生态系统服务价值评估可以提供参考。

参考文献(References)：

[1] 王军. 关于国土综合整治服务生态系统的思考[J]. 中国土地，2018(7):33－35. [Wang Jun. Thoughts on the service ecosystem of land comprehensive renovation[J]. China Land, 2018(7):33－35.]

[2] 钟莉娜. 农用地整理对区域生态系统服务的影响——以福建省建溪流域为例[D]. 北京：中国地质大学，2018. [Zhong Lina. Effects of Agricultural Land Consolidation on Regional Ecosystem Services: A case Study of Jianxi Watershed in Fujian Province[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2018.]

[3] 赵鸿雁，陈英，杨洁，等. 基于改进当量的甘肃省耕地生态系统服务价值及其与区域经济发展的空间关系研究[J]. 干旱区地理，2018，41(4):851－858. [Zhao Hongyan, Chen Ying, Yang Jie, et al. Ecosystem service value of cultivated land and its spatial relationship with regional economic development in Gansu Province based on improved equivalent[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(4):851－858.]

[4] 付意成，杜霞，彭文启，等. 流域农业土地生态价值内涵及应用分析[J]. 农业工程学报，2015，31(8):243－250. [Fu Yicheng, Du Xia, Peng Wenqi, et al. Agro-ecosystem value connotation based on watershed land use[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(8):243－250.]

[5] 王蓓，赵军，仲俊涛. 2005—2015 年石羊河流域生态系统服务时空分异[J]. 干旱区研究，2019，36(2):474－485. [Wang Bei, ZhaoJun, Zhong Juntao. Spatiotemporal differentiation of ecosystem services in the Shiyang river basin from 2005 to 2015 [J]. Arid Zone Research, 2019, 36(2):474－485.]

[6] Guerry A D, Polasky S, Lubchenco J, et al. Natural capital and ecosystem services informing decisions: from promise to practice[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2015, 112(24):7348－7355.

[7] 彭建，胡晓旭，赵明月，等. 生态系统服务权衡研究进展：从认知到决策[J]. 地理学报，2017，72(6):960－973. [Peng Jian, Hu Xiaoxu, Zhao Mingyue, et al. Research progress on ecosystem service trade-offs: from cognition to decision-making[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(6):960－973.]

[8] Runting R K, Bryan B A, Dee L E, et al. Incorporating climate change into ecosystem service assessments and decisions: a review [J]. Global Change Biology, 2017, 23(1):28－41.

[9] 刘世梁，安南南，王军. 土地整理对生态系统服务影响的评价研究进展[J]. 中国生态农业学报，2014，22(9):1010－1019. [Liu Shiliang, An Nannan, Wang Jun. Research progress on the effects of land consolidation on ecosystem services[J]. Chinese Journal of Eco-agriculture, 2014, 22(9):1010－1019.]

[10] Minura K, Izumi H, Satio Y, et al. Assessment of unionid freshwater mussel (*Pronodularia japanensis*) population in an agricultural channel during the 4 years following reintroduction[J]. Landscape & Ecological Engineer, 2018, 14(1):157－164.

[11] 王军，钟莉娜. 中国土地整治文献分析与研究进展[J]. 中国土地科学，2016，30(4):88－97. [Wang Jun, Zhong Lina. Literature analysis on land consolidation research in China[J]. China Land Sciences, 2016, 30(4):88－97.]

[12] 王军，钟莉娜，应凌霄. 土地整治对生态系统服务影响研究综述[J]. 生态与农村环境学报，2018，34(9):803－812. [Wang Jun, Zhong Lina, Ying Lingxiao. Review on the study of the impacts of land consolidation on ecosystem Services[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2018, 34(9):803－812.]

[13] 王雅，蒙吉军. 黑河中游土地利用变化对生态系统服务的影响[J]. 干旱区研究，2017，34(1):200－207. [Wang Ya, Meng Jijun. Effects of land use change on ecosystem services in the middle reaches of the Heihe river basin[J]. Arid Zone Research, 2017, 34(1):200－207.]

[14] 林亚辉. 基于 GIS 的当量价值改进法对渭河流域生态系统服务价值的评估[D]. 西安：陕西师范大学，2017. [Lin Yahui. Evaluation of Ecosystem Service Value of Weihe River Basin Based on GIS Equivalent Value Improvement Method[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2017.]

[15] 薛娟娟，葛永慧. 黄土高原矿区生态系统服务价值研究——以轩岗矿区为例[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版)，2018，46(4):91－97. [Xue Juanjuan, Ge Yonghui. Ecosystem service values in mining arear of Loess Plataeu: taking Xuangang mining area as an example[J]. Journal of Shaanxi Normal University (Nature Science Edition), 2018, 46(4):91－97.]

[16] 赵明月，彭建，郑华，等. 自然资本科学和决策实践：宜居城市和可持续发展——2018 年自然资本项目年会述评[J]. 生态学报，2018，38(13):4917－4921. [Zhao Mingyue, Peng Jian, Zheng

Hua, et al. Natural capital science and decision-making practice: livable cities and sustainable development, comments on the 2018 annual conference of natural capital items[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(13): 4917 - 4921.]

[17] 谢高地,张彩霞,张雷明,等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J]. 自然资源学报,2015,30(8): 1243 - 1254. [Xie Gaodi, Zhang Caixia, Zhang Leiming. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(8): 1243 - 1254.]

[18] 薛明皋,邢路,王晓艳. 中国土地生态系统服务当量因子空间修正及价值评估[J]. 中国土地科学,2018,32(9): 81 - 88. [Xue Minggao, Xing Lu, Wang Xiaoyan. Spatial correction and evaluation of ecosystem services in China[J]. China Land Science, 2018, 32(9): 81 - 88.]

[19] 徐勇,安祥生,杨波,等. 黄土高原坡改梯综合效益分析——以燕沟流域为例[J]. 中国水土保持科学,2010,8(1): 1 - 5, 12. [Xu Yong, An Xiangsheng, Yang Bo, et al. Synthetic analyses of effects of farm land terracing on the Loess Plateau: A case study of Yangou watershed[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2010, 8(1): 1 - 5, 12.]

[20] 陈蝶,卫伟,陈利顶,等. 梯田生态系统服务与管理研究进展[J]. 山地学报,2016,34(3): 374 - 384. [Chen Die, Wei Wei, Chen Liding, et al. Progress of the ecosystem services and management of terraces[J]. Mountain Research, 2016, 34(3): 374 - 384.]

[21] 赵万广,高玉凤,王锦志,等. 黄土高原土石山区坡改梯后土壤水分及养分特征[J]. 中国水土保持,2018,(4): 50 - 54, 69. [Zhao Wanguang, Gao Yufeng, Wang Jinzhi, et al. Characteristics of soil moisture and nutrient of terracing farmland in mountainous region of Loess Plateau[J]. Soil and Water Conservation in China, 2018, (4): 50 - 54, 69.]

[22] Shimeles D, Tamene L, Vlek P. Performance of farmland terraces in maintaining soil fertility: a case of Lake Maybar watershed in Wello, Northern Highlands of Ethiopia[J]. Journal of Life Sciences, 2012, 6(11): 1251 - 1261.

[23] 邱宇洁,许明祥,师晨迪,等. 陇东黄土丘陵区坡改梯田土壤有机碳累积动态[J]. 植物营养与肥料学报,2014,20(1): 87 - 98. [Qiu Yujie, Xu Mingxiang, Shi Chendi, et al. Dynamic accumulation of soil organic carbon of terrace changed from slope cropland in the hilly Loess Plateau of eastern Gansu Province[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(1): 87 - 98.]

[24] 杨慧玲. 蒙阴县毛坪小流域生态修复示范工程生态效益监测与评价[D]. 泰安:山东农业大学,2010. [Yang Huiling. Monitoring and Evaluation of Ecological Benefit of the Ecological Rehabilitation Region in the Maoping Watershed of Mengyin County[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2010.]

[25] 朱文泉,潘耀忠,张锦水. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算. 植物生态学报,2007,31(3): 413 - 424. [Zhu Wenquan, Pan Yaozhong, Zhang Jinshui. Estimation of net primary productivity of Chinese terrestrial vegetation based on remote sensing[J]. Journal of Plant Ecology, 2007, 31(3): 413 - 424.]

[26] 郧文聚. 关于加快土地整治创新的思考[J]. 华中农业大学学报(社会科学版),2011(6): 1 - 5. [Yun Wenju. Thoughts on accelerating land consolidation innovation[J]. Journal of Huazhong Agricultural University (Social Sciences Edition), 2011(6): 1 - 5.]

[27] 傅伯杰,张立伟. 土地利用变化与生态系统服务:概念、方法与进展[J]. 地理科学进展,2014,33(4): 441 - 446. [Fu Bojie, Zhang Liwei. Land-use change and ecosystem services: concepts, methods and progress[J]. Progress in Geography, 2014, 33(4): 441 - 446.]

[28] 余强,王占岐,杨俊. 土地整治项目中生态服务价值损益研究——基于平原、丘陵、山区的实证对比[J]. 国土资源科技管理,2014,31(4): 15 - 21. [Yu Qiang, Wang Zhanqi, Yang Jun. Gains and losses of ecosystem services value in land consolidation projects: Based on comparisions of plains, hills and mountainous areas[J]. Scientific and Technological Management of Land and Resources, 2014, 31(4): 15 - 21.]

[29] 李立平,李晓明,魏君平. 土地整治实施区域生态系统服务价值变化研究——以榆阳区为例[J]. 西部大开发(土地开发工程研究),2017,2(7): 15 - 19. [Li Liping, Li Xiaoming, Wei Junping. Study on the change of regional ecosystem service value in land consolidation: a case study of Yuyang District[J]. Land Development and Engineering Research, 2017, 2(7): 15 - 19.]

Evaluation of the ecosystem service value with land consolidation: Parameter optimization and empirical study

ZHAO Hong-yan[1], CHEN Ying[1,2], PEI Ting-ting[2], XIE Bao-peng[2], ZHOU Yi[2], REN Xi-jin[2], LIU Yang[3]

(1. *College of Resources and Environment, Gansu Agricultural University, Lanzhou* 730070, *Gansu, China*;
2. *College of Management, Gansu Agricultural University, Lanzhou* 730070, *Gansu, China*;
3. *China Centre for Land Policy Research, Nanjing Agricultural University, Nanjing* 210095, *Jiangsu, China*)

Abstract: To quantitatively study the variations in the ecosystem service value before and after land consolidation in a specific region, a land consolidation sub-project in the Qingyang City was examined based on the optimization of its parameters according to the limitations of the evaluation method of the ecosystem service value. The results show that (1) using scale deduction, the core parameters of the evaluation methods of the ecosystem service value on macro and large scales can be optimized by various methods, including the revision of market factors, the formulation of the value equivalents of special ecosystem types, and the correction of the net primary productivity value equivalence pertinent to the spatial differences observed within the region. The optimized parameters of the evaluation method of the ecosystem service value reduce the limitations of applying the equivalent factor method to specific application scales and are more reasonable. (2) The empirical evidence concerning the variation in the ecosystem service value before and after land consolidation based on the optimized parameters indicates that the ecosystem service value reduced from 2.88×10^8 yuan to 2.76×10^8 yuan in four years (before to after land consolidation), with a total reduction of 4.31%. Under the first-level classification system of ecosystem services, only the value of the regulating services decreased by 1.84×10^7 yuan, whereas the values of the remaining services increased. Under the second-level classification system, the food production, soil conservation, nutrient cycling, aesthetic value, and water supply functions improved compared to those prior to land consolidation; the improvement in the food production function was the largest at 8.35×10^6 yuan; meanwhile, raw material production, biodiversity, and the four types of ecosystem services included in regulation services were observed to decrease. The results indicate that this method can be used to evaluate the ecosystem service value of the conversion of sloping farmland to terraced fields and that it can provide a considerable reference value for the evaluation of the ecosystem service value of the loess hilly and gully areas of landforms, including residual hills, valleys, and slopes.

Key words: ecosystem services; land consolidation; parameter optimization; Qingyang city